

UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

Multilevel Integrated Step-Up (MIS)
Wechselrichter – Steuerung und Regelung
eines Mehrpunktwechselrichters für
Synchronmaschinen

Philip Brockerhoff

Vorsitzender des Promotionsausschusses:	Prof. Dr. rer. nat. habil. C. Hillermeier
1. Berichterstatter	Prof. Dr.-Ing. R. Marquardt
2. Berichterstatter	Prof. Dr.-Ing. habil. F. Anritter

Tag der Prüfung 31.5.2012

Mit der Promotion erlangter akademischer Grad:
Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)

Neubiberg, im Juli 2012

Forschungsberichte Leistungselektronik und Steuerungen

Band 6

Philip Bockerhoff

Multilevel Integrated Step-Up (MIS) Wechselrichter

Steuerung und Regelung eines Mehrpunktwechselrichters
für Synchronmaschinen

Shaker Verlag
Aachen 2012

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: München, Univ. der Bundeswehr, Diss., 2012

Copyright Shaker Verlag 2012

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1170-8

ISSN 1867-5700

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Kurzfassung

Für moderne, mobile Antriebskonzepte, speziell Elektrofahrzeuge und Hybridfahrzeuge, sind Elektromaschinen mit hoher Leistungs- und Kraftdichte notwendig. Die permanenterregte Synchronmaschine in hochpoliger Ausführung zeigt hier besondere Vorteile. Die Arbeit zeigt für diese Maschine ein neuartiges Multilevel-Umrichterkonzept, das speziell für Maschinen mit hoher Polpaarzahl und niedrigem Leistungsfaktor geeignet ist.

Die Topologie beinhaltet in jedem Brückenweig einen zusätzlichen, geschalteten Kondensator, dessen Spannung in Abhängigkeit von Drehzahl und Drehmoment eingeregelt werden kann und zur Zwischenkreisspannung hinzu addiert werden kann.

Dabei wird die Motorinduktivität als integrierter Hochsetzsteller genutzt, um die zusätzliche Spannungskomponente im geschalteten Kondensator zu erzeugen.

Die Vorteile des Umrichters bestehen in der erhöhten Ausgangsspannung, die größer als der Zwischenkreisspannung ist, der Verkleinerung der Filter und der geringeren Schaltfrequenz der einzelnen Halbleiter durch die Multilevelausgangsspannung. Durch die erhöhte Ausgangsspannung kann zum Beispiel der Zwischenkreishochsetzsteller entfallen. Die interne, zusätzliche Spannungskomponente ist frei einregelbar. Zusätzlich speist die leerlaufende Maschine nicht mehr bei abgeschaltetem Umrichter auf den Zwischenkreis zurück, da im internen Kondensator eine Gegenspannung vorhanden ist.

Auf Grund der speziellen Funktionalität wird die Topologie *Multilevel Integrated Step-Up*¹ (MIS) Wechselrichter genannt.

Aus der Summe der Vorteile ergibt sich für mobile Anwendungen ein leichteres und effizienteres System, welches die spezifischen Anforderungen erfüllt, die mit Standardkomponenten nur unzureichend erfüllt sind.

¹Multilevel integrierter Hochsetzsteller

Abstract

Increased power and torque density represents a major requirement for mobile electric drives, especially future electric vehicles or hybrid electric vehicles. Permanent magnet synchronous machines with high pole pair numbers are well adopted to these needs. In order to take full advantage of their characteristics, a new multilevel inverter topology for this type of electric machine is investigated. The new inverter topology is especially suited to drive machines with low power factor and high pole pair number.

The topology contains a switched capacitor in each phase leg. The capacitor's voltage is controlled independently of the DC link according to speed or torque requirements.

The motor inductance is utilized for a step up conversion to generate the additional voltage component and an output voltage higher than the DC link voltage.

The advantages of the inverter are a higher output voltage, reduced filter size by the multilevel output voltage and lower switching frequency. Furthermore, there is no DC/DC chopper necessary, because the internal capacitor compensates DC link variations. Additionally a free wheeling drive will not feed energy into the DC link, because the internal capacitor voltage compensates the back emf voltage of the machine.

Because of its special features, the topology is called Multilevel Integrated Step-Up (MIS) inverter.

For mobile electric drives, the topology's benefits create a lighter and more efficient system, that meets the requirements, that are not sufficient fulfilled with state of the art components.

Vorwort

Diese Dissertation ist das Ergebnis meiner Arbeit am Institut für Leistungselektronik und Steuerungen an der Universität der Bundeswehr München in Zusammenarbeit mit verschiedenen Industriepartnern.

Ich möchte mich bei Prof. Dr.-Ing. Rainer Marquardt, Leiter des Instituts, meinem Doktorvater, danke ich für die Anregung zu dieser Arbeit, für die Unterstützung, stetige Förderung und zahlreiche Anregungen. Prof. Dr.-Ing. Felix Anritter danke ich für die freundliche Unterstützung und die Übernahme eines Gutachtens. Ich möchte mich weiterhin bei den Assistenten des Lehrstuhls für ihre tägliches Mitwirken, ihre Gedanken und Anregungen, für ihre Kritik und Ideen bedanken.

Weiterhin möchte ich mich auch noch bedanken bei:

- allen Studenten, die während meiner Assistentenzeit ihre Studien- und Diplomarbeiten, sowie ihre Bachelor- und Masterarbeiten erstellt haben
- den studentischen Hilfskräften und den technischen Angestellten, die durch ihre Arbeit am Gelingen dieser Dissertation wesentlichen Anteil haben
- und meiner Familie, die meine Arbeit immer unterstützt hat.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Anforderungen an Wechselrichter in Fahrzeuganwendungen	5
1.2	Beitrag der Arbeit	6
1.3	Ziel der Arbeit	7
1.4	Aufbau der Arbeit	8
2	Stand der Technik für Fahrzeugwechselrichter	11
2.1	Darstellung existierender Zweipunktwechselrichter	15
2.2	Wechselrichtertopologien mit zusätzlicher interner Spannung	21
2.3	Darstellung existierender Mehrpunktwechselrichter	23
2.4	Einordnung des MIS im Vergleich zu anderen Zweipunkt- und Mehrpunktschaltungen	32
3	Spannungserzeugung und Steuerung	33
3.1	Konfigurationsbeispiele für MIS Wechselrichter	37
3.2	MISB: MIS Boost Wechselrichter mit kleinem Energiespeicher	39
3.2.1	Dimensionierung des internen Kondensators	42
3.2.2	Einfluss der Verriegelungszeit	43
3.3	MISE: MIS Energy Storage Wechselrichter mit integriertem Energiespeicher	44
3.4	Steuerung der internen Kondensatorspannung	47
3.4.1	Steuerung für MISB Wechselrichter	47

3.4.2	Steuerung für MISE Wechselrichter	51
3.5	Steuergrenzen und Regelung der internen Kondensatorspannung	54
3.6	Schaltfrequenzbetrachtung und Oberschwingungen des Wechselrichters	57
3.7	Modellbildung der PMSM in dq Koordinaten	61
3.8	Erweiterter Betriebsbereich der PMSM durch den MIS Wechselrichter	65
4	Effizienzbetrachtung	83
4.1	Beispielsystem für die Auslegung einer PMSM	84
4.2	Verlustmodellierung der PMSM	85
4.3	Verlustmodellierung der Halbleiter	88
4.4	Änderung der Wicklungszahl zur Anpassung an den Wechselrichter	89
4.5	Verlustberechnung des Gesamtsystems	94
4.6	Systeme mit Hochsetzsteller und Systeme mit Multilevelwechselrichter	107
4.7	Qualitativer Vergleich des Aufwands der Auslegungen	108
4.7.1	Halbleiteraufwand	109
4.7.2	Aufwand an passiven Komponenten	110
5	Drehmomentregelung der PMSM	113
5.1	Direkte Statorstromregelung mit Hystereseregler	116
5.2	Regelstrukturen im Maschinenmodell der PMSM	116
5.3	Entwurf einer neuen Regelstruktur für den MIS Wechselrichter	117
5.4	Überlagerter Kondensatorspannungsregler	119
5.4.1	Drehmomentregelung im unteren Drehzahlbereich	120
5.4.2	Drehmomentregelung im oberen Drehzahlbereich mittels Blocktaktung	120

6	Dimensionierung, Aufbau und Messung	125
6.1	Auslegung des Wechselrichters und des Prüfstandes	125
6.2	Implementierung der gewählten Regelstruktur	130
6.2.1	Hardwarekonzept mit FPGA und DSP	130
6.3	Prüfstandsmaschine und Aufbau	133
6.3.1	Neuartige PMSM aus weichmagnetischem Verbundwerkstoff	134
6.3.2	Neuartiger Lagegeber für Permanenterregte Synchronmaschine	137
6.4	Messungen am Testsystem im Labor	148
6.4.1	Erhöhung des Ausgangsstromes mit MIS Wechselrichter	150
6.4.2	Messung bei niedriger Drehzahl	151
6.4.3	Messung bei hoher Drehzahl	153
7	Zusammenfassung und Ausblick	157
8	Anhang	161
8.1	Schaltzustände für MIS Wechselrichter	161
8.2	Betreute Arbeiten im Rahmen der Dissertation	164

Abbildungsverzeichnis

2.1	Konventionelle B6 Schaltung für dreiphasige Maschinen . . .	15
2.2	Konventionelle Vollbrückenschaltung für dreiphasige Maschinen	15
2.3	Übersichtsbild eines Mehrmotorensystems mit Filtern . . .	17
2.4	Leistungsfluss für eine konventionelle Konfiguration in Hybridsystemen mit zwei Motoren und Energiespeicher . . .	18
2.5	Z-Source Wechselrichter	18
2.6	Cascaded H-bridge Multilevel Boost Wechselrichter	21
2.7	Flying Bridge Wechselrichter	22
2.8	Diode Clamped Multilevel Wechselrichter	26
2.9	Kaskadierter H-Brücken Wechselrichter (CHB)	26
2.10	Flying Capacitor Wechselrichter für 4-Level Ausgangsspannung	27
2.11	Modularer Multilevel Wechselrichter (M2C)	29
2.12	Modularer hochfrequenz Wechselrichter (MHF)	29
2.13	Stand des MIS Wechselrichters bzgl. anderer Strukturen . .	32
3.1	Grundelement des MIS Wechselrichters	34
3.2	Grundelement des MIS Wechselrichters für eine Vollbrückenschaltung	35
3.3	MISB: MIS Schaltung für einen Parallelhybrid oder ein Elektrofahrzeug	37

3.4	MISE: MIS Schaltung für leistungsverzweigten oder seriellen Hybridantrieb ohne großen Energiespeicher im Zwischenkreis	38
3.5	4-Level Ausgangsspannung des MIS Wechselrichters für Kondensatorspannung größer als Zwischenkreisspannung und Vollbrücken-Konfiguration	39
3.6	Zustandsdiagramm für Vollbrücken MISB Wechselrichter für eine Phase	40
3.7	MIS Wechselrichter Ersatzschaltbild für Leerlauf Vollbrücke	41
3.8	MIS Wechselrichter Ersatzschaltbild für dreiphasigen Leerlauf	41
3.9	MIS Wechselrichter in dreiphasiger Ausführung	44
3.10	5 Level Ausgangsspannung des MIS Wechselrichters mit großem Energiespeicher	45
3.11	Konstanter Betriebspunkt mit interner Kondensatorspannung für induktive Last	49
3.12	Änderung der Kondensatorspannung für induktive Last zur Anpassung des Betriebspunktes	49
3.13	Möglichkeiten zur Einstellung der internen Kondensatorspannung	70
3.14	Erweiterung des internen Kondensators zum Energiespeicher	71
3.15	Leistungsfluss für ein Hybridsystem mit MIS Wechselrichter für eine Maschine	71
3.16	Definition der Winkel und Aussteuergrade für MIS Wechselrichter	72
3.17	Maximale Ausgangsspannung in Abhängigkeit der Schaltwinkel	73
3.18	Stromform für mittleren Drehzahlbereich	74
3.19	Stromform für oberen Drehzahlbereich	75
3.20	Stromkurvenform mit Standard-Wechselrichter unter Teillast	76
3.21	Stromkurvenform mit Standard-Wechselrichter unter Vollast	77

3.22	Ersatzschaltbild zur Regelung des dynamischen Verhaltens der zweiphasigen PMSM in dq Koordinaten	78
3.23	Vereinfachtes, einphasiges ESB der PMSM für konventionelle Topologie	78
3.24	Vereinfachtes, einphasiges ESB der PMSM für MIS Wechselrichter	78
3.25	Vektordiagramm für konventionelle Auslegungen von Maschine und Wechselrichter im Ankerstellbereich	79
3.26	Vektordiagramme für konventionelle Auslegungen von Maschine und Wechselrichter mit Feldschwächung	79
3.27	Beispielhafter Betriebspunkt für MIS Wechselrichter mit Maschine mit $X > 1$	79
3.28	Erweiterter Betriebsbereich mit MISB Wechselrichter . . .	80
3.29	Maximale Ausgangsspannung für MISE in dq Koordinaten abhängig vom Leistungsfluss	81
4.1	Ersatzschaltbild der PMSM mit Eisen- und Kupferverlusten	87
4.2	Spannungskomponenten des internen Kondensators im Feldschwächbetrieb und Motorstrom	99
4.3	Minimaler Motorstrom in Abhängigkeit der Aussteuerung der Zwischenkreisspannung mit Boostkondensator	101
4.4	Vergleich der Systemverluste für verschiedene Auslegungen in [W]	101
4.5	Motorstrom für verschiedene Auslegungen	103
4.6	Zeigerbilder für hohe Drehzahl und verschiedene Auslegungen	104
4.7	Ausgangsspannung und -strom des MISB Wechselrichter im Teillast-Bereich bei maximaler Drehzahl	105
4.8	Ausgangsspannung und -strom des MISB Wechselrichter bei maximaler Drehzahl unter Volllast	106
4.9	Ausgangsspannung und -strom des Vollbrückenwechselrichters im Teillast-Bereich bei maximaler Drehzahl	106
4.10	Ausgangsspannung und -strom des Vollbrückenwechselrichters bei maximaler Drehzahl unter Volllast	106
4.11	Hochsetzsteller zur Regelung der Zwischenkreisspannung .	107

5.1	Schematische Darstellung der Maximalwerte der Leistung, des Drehmoments und des Motorstroms bezogen auf die Drehzahl des Antriebs	115
5.2	Drehzahlregelung für eine zweiphasige PMSM in dq Koordinaten	117
5.3	Übersicht der Regelungsstruktur für MIS Wechselrichter .	118
5.4	Leistungsverläufe des Antriebssystems bei Lastsprung und konstanter Drehzahl	122
5.5	Ausgangsspannung des MIS Wechselrichters und Motorstrom bei Lastsprung	123
6.1	Übersicht Kondensatoren in der Leistungselektronik . . .	127
6.2	Aufbau der Zwischenkreisverschienung mit Übersichtsbild der Lagenfolge	128
6.3	Hydraulisches Ersatzschaltbild der Kühlung der Leistungselektronik(rechts) und der neuartigen PMSM(links)	129
6.4	Rohbau des Wechselrichters	130
6.5	Übersicht der Elektronikkomponenten DSP und FPGA . .	131
6.6	Blockschaltbild des Prüfplatzes für neuartige Maschine und Leistungselektronik	133
6.7	Neuartige Permanenterregte Synchronmaschine aus SMC	134
6.8	Einbau des neuartigen Lagegebers in die PMSM	140
6.9	Prototyp des Hall-Sensor-Lagegebers	140
6.10	Abfolge der Sensorsignale	143
6.11	Analoger Ausgangspegel für dekodierte Sensorsignale . . .	143
6.12	Ausgangsspannung des Lagegebers bei Leerlauf und langsamer Drehzahl	144
6.13	Ausgangsspannung des Lagegebers bei Nennmoment und mittlerer Drehzahl	145
6.14	Beispiel für die Ausgangsspannung des neuartigen Lagegebers	146
6.15	Links: PMSM Prototyp, rechts: Laboraufbau des MISB Wechselrichters	148
6.16	Maschinenprüfstand mit Gleichstrommaschinen	149

6.17 Volles Moment der PMSM bei niedriger Drehzahl und angepasster Zwischenkreisspannung	150
6.18 Leerlaufspannung der PMSM, zweiphasig, $\hat{V}_{emf} = 170V$	151
6.19 Ausgangsstrom bei Vollaussteuerung	152
6.20 Ausgangsstrom bei Vollaussteuerung mit internem Kondensator	153
6.21 Stromkurvenform für unteren Drehzahlbereich	154
6.22 Stromform für oberen Drehzahlbereich ohne Last	155
6.23 Stromform für oberen Drehzahlbereich mit Last	156

Tabellenverzeichnis

2.1	Vergleich der verschiedenen Zweipunktschaltungen mit MIS Wechselrichter	20
2.2	Vergleich der verschiedenen Zweipunktschaltungen mit Energiespeicher	24
2.3	Vergleich der verschiedenen Multileveltopologien	31
3.1	Schaltzustände für MIS Wechselrichter in Vollbrückenschaltung	36
3.2	Schaltvektoren und redundante Zustände für MISB	40
3.3	Schaltvektoren und redundante Zustände für MISE	46
4.1	Daten der PMSM für das Auslegungsbeispiel	96
4.2	Vergleich der Systemverluste für verschiedene Auslegungen	111
4.3	Halbleiteraufwand der Wechselrichter	112
6.1	Maschinendaten der neuartigen PMSM aus SMC	137
6.2	Dekodierung der Sensorausgänge zu elektrischen Winkeln	142
8.1	Schaltzustände für MIS Wechselrichter in dreiphasiger Schaltung	163

Nomenklatur

Griechische Variablen

α_{boost}	Aussteuerung der Spannungskomponente aus internem Kondensator in °elektr.
α_{DC}	Aussteuerung der Spannungskomponente aus Zwischenkreis in °elektr.
ϵ	Elektrischer Drehwinkel
φ	Phasenwinkel zwischen Wechselrichterausgangsspannung und Strom der Maschine
φ_{emf}	Phasenwinkel zwischen Maschinenstrom und rotatorischer Spannung (q-Achse)
φ_{DC}	Phasenwinkel zwischen der Zwischenkreisspannung und der rotatorischer Spannung (q-Achse)
φ_{boost}	Phasenwinkel zwischen der internen Kondensatorspannung und der rotatorischer Spannung (q-Achse)
$\eta_{elektrisch}$	Elektrischer Wirkungsgrad
σ	Elektrische Leitfähigkeit
ω	Mechanische Winkelgeschwindigkeit
Ψ	Resultierender Fluss in der Maschine
Ψ_{pm}	Magnetischer Fluss der Permanentmagnete
Ψ_I	Magnetischer Fluss der Motorwicklung

Lateinische Variablen

Einheit

a	Tastgrad bzw. Aussteuerung des Wechselrichters	F
A	Querschnittsfläche der Motorkupferwicklung	m^2
C_b	Kapazität des internen Boostkondensators des MIS Wechselrichters	F
C_{DL}	Kapazität eines Doppelschichtkondensators	Ws/J
E_c	Energieinhalt eines Boostkondensators	J
E_{DL}	Energieinhalt eines Doppelschichtkondensators	J
E_{off}	Ausschaltverluste des IGBT	J
E_{on}	Einschaltverluste des IGBT	J
E_{rr}	Reverse-Recovery-Verluste der Inversdiode	J
E_{ss}	Gesamtverluste pro Schaltvorgang	J
f	Frequenz	s^{-1}
f_p	Schaltfrequenz der IGBT	s^{-1}
I	Motorstrom	A
I^*	Äquivalenter Durchlassstrom	A
I_K	Kurzschlussstrom bei Wicklungskurzschluss	A
k	Nummer der Oberschwingung	
l	Levelzahl für Mehrpunktschaltungen	
l_{cu}	Länge der Motorkupferwicklung	m
L	Induktivität der Maschine	H
L_d	Längsinduktivität	H
L_{esl}	Serieninduktivität eines Kondensators (Equivalent Series Inductance)	H
L_q	Querinduktivität	H
M	Mechanisches Drehmoment des Antriebs	Nm
n	Mechanisches Drehzahl des Antriebs	s^{-1}
p	Phasenzahl der Maschine	
P	Wirkleistung des Antriebs	W
P_e	Eisenverluste der Maschine	W
ppz	Polpaarzahl der Maschine	
P_{cu}	Kupferverluste der Maschine	W
P_{on}	Durchlassverluste pro Phase	W
P_{sw}	Schaltverluste der IGBTs	W

P_V	Verlustleistung des Wechselrichters	W
$P_{V_{ges}}$	Verlustleistung des Gesamtsystems	W
$P_{V_{maschine}}$	Verlustleistung des Motors	W
$P_{V_{wr}}$	Verlustleistung des Wechselrichters	W
R_e	Ersatzwiderstand der Eisenverluste	Ω
R_{esr}	Serienwiderstand eines Kondensators (Equivalent Series Resistance)	Ω
R_{cu}	Kupferwiderstand der Statorwicklung	Ω
r_t	Durchlasswiderstand	Ω
T	Zeit einer elektrischen Grundschiwingung	s
T_d	Zeitkonstante der d-Achse	s
T_q	Zeitkonstante der q-Achse	s
THD	Verzerrung des Motorstromes (Total Harmonic Distortion)	
w	Wicklungszahl	
q	Anzahl der stromtragenden Halbleiter pro Phase	
V_{boost}	Interne Kondensatorspannung	V
V_c	Effektivwert der Grundschiwingungskomponente aus internem Boostkondensator	V
V_{ces}	IGBT Sperrspannung	V
V_d	Effektivwert der Grundschiwingungskomponente aus Zwischenkreisspannung	V
V_D	Effektivwert der Spannungskomponente in d-Richtung	V
V_{DC}	Effektivwert der Zwischenkreisspannung	V
V_{DL}	Spannung der internen Doppelschichtkondensatoren (Double Layer Capacitor)	V
V_{emf}	Effektivwert der Rotatorische Spannung	V
V_L	Effektivwert der Grundschiwingungskomponente der Spannung über L	V
V_{out}	Effektivwert der Ausgangsspannung des Wechselrichters bzw. Klemmenspannung der Maschine	V

V_{outB}	Effektivwert der Blindleistung des Wechselrichters	V
V_{outW}	Effektivwert der Wirkleistung des Wechselrichters	V
V_Q	Effektivwert der Spannungskomponente in Q-Richtung	V
V_{TO}	Durchlassspannung des IGBTs	V
X	Dimensionsloser Quotient von Stator- und Rotorfluss	

Konstanten

π	3,14159	Kreiszahl
ϵ_0	$8,854 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$	Permittivität des Vakuums
μ_0	$12,57 \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$	Vakuumpermeabilität

Index

$V_{DL1,2,3}$	Bezogen auf jeweilige Phase eins bis drei
V_0	Bezugswert im Nennpunkt
V^*	Sollwert
f_{elektr}	Elektrisch
V_{max}	Maximalwert
M_{mech}	Mechanisch
V	Effektivwert (für Variablen ohne Bezeichnung)
V_{min}	Minimalwert
\vec{V}	Vektorgröße in Betrag und Winkel
\hat{V}	Maximalwert der Amplitude
$ V $	Betragswert

Abkürzungen

2QS	Zweiquadrantensteller
4QS	Vierquadrantensteller
ADC	Analog Digital Converter
AKS	Aktiver Wicklungskurzschluss
BLDC	Brushless DC Motor, elektrisch kommutierte Gleichstrommaschine
CHB	Kaskadierter H-Brücken Wechselrichter (Cascaded H-bridge Inverter)
DAC	Digital Analog Converter
DCDC	Gleichspannungs- (Direct current to direct current)
DLC	Double Layer Capacitor (Doppelschichtkondensator)
DSP	Digitaler Signalprozessor
DUT	Device Under Test
ESB	Ersatzschaltbild
ESL	Serieninduktivität eines Kondensators (Equivalent Series Inductance)
ESR	Innenwiderstand eines Kondensators (Equivalent Series Resistance)
FPGA	Field Programmable Gate Array
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
LWL	Lichtwellenleiter
M2C	Modularer Multilevel Converter
MHF	Modularer hochfrequenz Wechselrichter

MIS	Multilevel Integrated Step-up
MISB	Multilevel Integrated Step-up Boost
MISE	Multilevel Integrated Step-up Energy Storage
MMPA	Regelverfahren nach maximalen Moment pro Ampere
MMPV	Regelverfahren nach maximalen Moment pro Volt
MOSFET	Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekt-Transistor
NdFeB	Neodymeisenbor (Magnetmaterial)
NPC	Neutral Point Clamped
PAM	Pulsamplitudenmodulation
PCB	Printed Circuit Board
PCC	Power Capacitor Chip
PWM	Pulsweitenmodulation
PLL	Phase-locked Loop
PMSM	Permanenterregte Synchronmaschine
SiC	Siliziumcarbid
SMC	Soft Magnetic Composite
THD	Total Harmonic Distortion